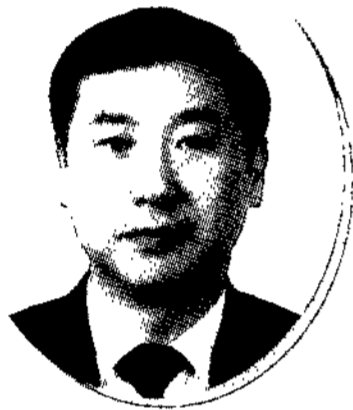


제주 현무암지역에서의 취·배수로 해저터널 설계 및 시공사례



김종철
현대ENG(주)
지반공학부 부장
(jckim@hec.co.kr)



허영희
현대ENG(주)
지반공학부 과장



권중락
한국남부발전(주)
영월화력건설소장



고형석
한국남부발전(주)
영월화력토건부장



정유채
동아지질(주) 상무

1. 서론

발전소 건설에 있어서 안정적인 전력을 생산하기 위하여 냉각수 공급은 필수적이며, 냉각수의 원활한 공급을 위한 취·배수구조물은 발전소 건설에 필요한 주요 시설물로 지질 및 해양조건, 환경조건, 민원 등을 고려하여 구조물을 계획하게 된다.

취·배수 구조물은 해양조건에 따라 취·배수방식(심층, 표층)이 결정되고, 구조물의 위치결정은 지형 및 지질, 수온, 온배수 확산 등을 고려하여 결정되어야 한다.

본 제주지역은 지역적 특성상 청정지역이면서 국내 최대의 관광지이고 특히, 발전소 인근에는 양식

장 등 어민들의 조업이 이루어지고 있는 위치이며, 공사 진행 및 발전소가동시 온배수에 의한 영향을 고려하여 환경적으로 생태계에 미치는 영향을 최소화하여야만 한다.

본고에서는 주변의 환경적인 여건은 물론이고 민원발생을 최소화하면서 안정적인 발전소가동을 위하여 국내 최초로 적용한 발전소 취·배수로 구조물의 해저 터널공법에 대하여 소개하고 특히, 다공질 현무암지대에서의 기계식 터널공법(세미셴드, I.D 2400mm)의 설계 및 시공사례를 정리, 분석하여 제 공함으로써 향후 해상에 계획되어지는 유사한 취·배수로의 설계·시공시 유용한 기초자료가 될 수 있기를 바란다.

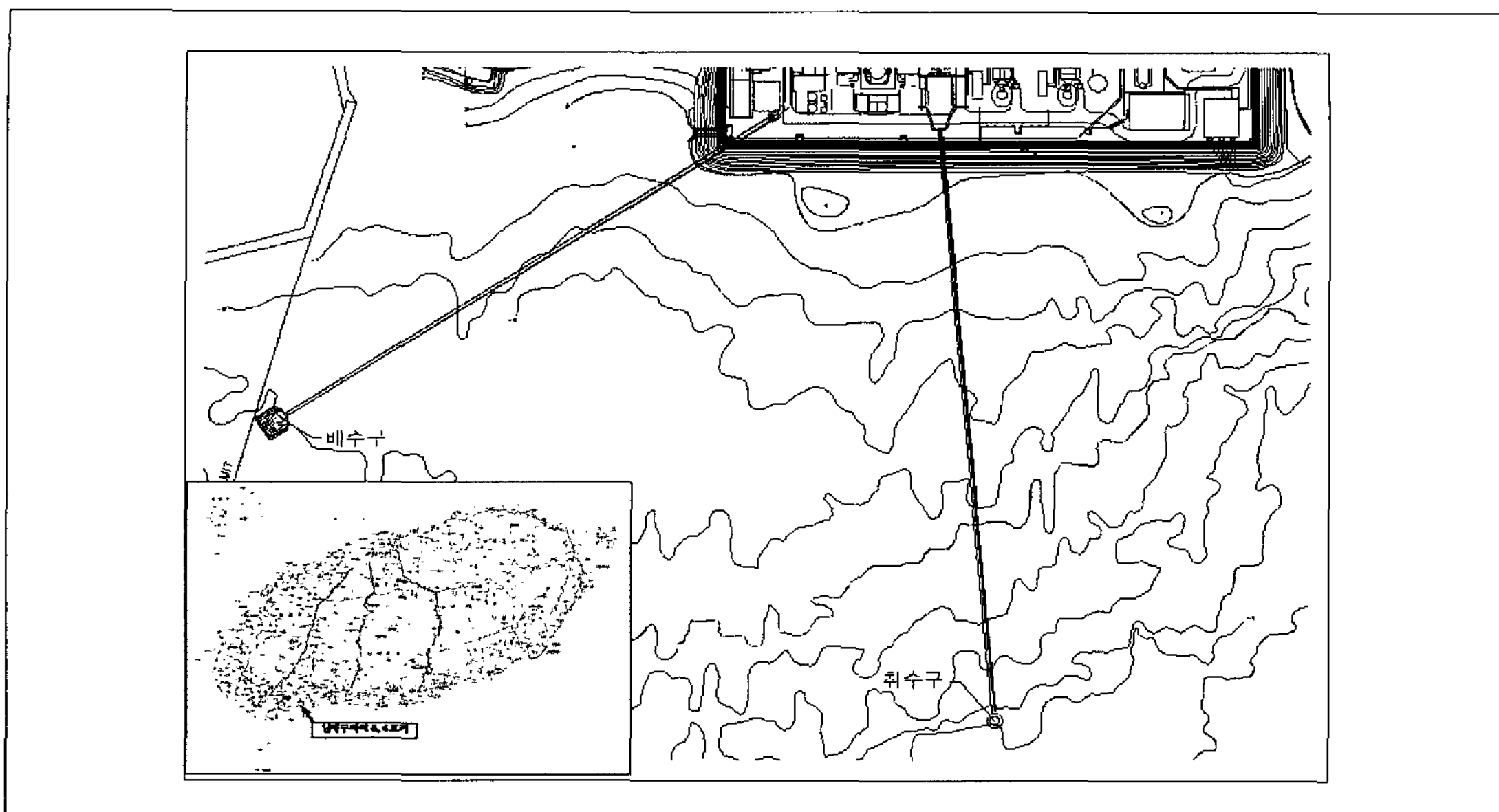


그림 1. 과업위치도 및 현황평면도

2. 현황

1) 취·배수 구조물 현황

남제주지역의 기존 전력공급원인 00화력발전소 1, 2호기와 향후 증가될 전력 부하량에 대비하여 안정적인 전력을 공급하기 위한 3, 4호기의 추가 증설이 추진되는 가운데 발전소의 냉각수 취·배수를 위해 해저 취수터널(약 405M)/배수터널(약 395M)와 해상 취수탑(1개소)/배수탑(1개소)을 건설하는 사업이다.

2) 지반 현황

본 지역의 지질 및 지층분포 현황을 조사 분석하기 위하여 시추조사 및 현장원위치 시험을 수행하였

으며, 주요 조사내용을 요약하면 아래 표 1과 같다.

본 조사지역 일원의 지질은 신생대 제 4기층으로서, 군산응회암(군산조면현무암)을 최하부로 하며, 이를 관입, 피복한 강정동현무암질조면안산암, 한라산조면암, 법정동조면현무암 그리고 병악현무암질조면안산암의 순으로 분포하고 있다(모슬포·한림도폭 설명서, 1:50,000, 한국자원연구소, 2000년 참조).

조사지역의 암석은 용암분출에 의한 화산암, 화산폭발에 의한 화산쇄설암, 그리고 퇴적암(층)으로 크게 구성되어 있다. 지층구성은 육상부에서 상부 매립-풍화암 또는 연암-경암 순으로 분포하고 있으며, 해상부는 상부에 부분적으로 얇은 퇴적층(모래, 자갈)이 분포하고 완만한 경사를 이루고 있으며, 연

표 1. 과업구간 조사 현황

조사지역	시추조사 (NX)	SPT	수압시험	공내재하시험 /공내영상촬영	일축압축 강도시험	비고
발전구	2개소	5회	6회	-	6회	
해상부	7개소	18회	15회	6회/2회	23회	

제주 현무암지역에서의 취·배수로 해저터널 설계 및 시공사례

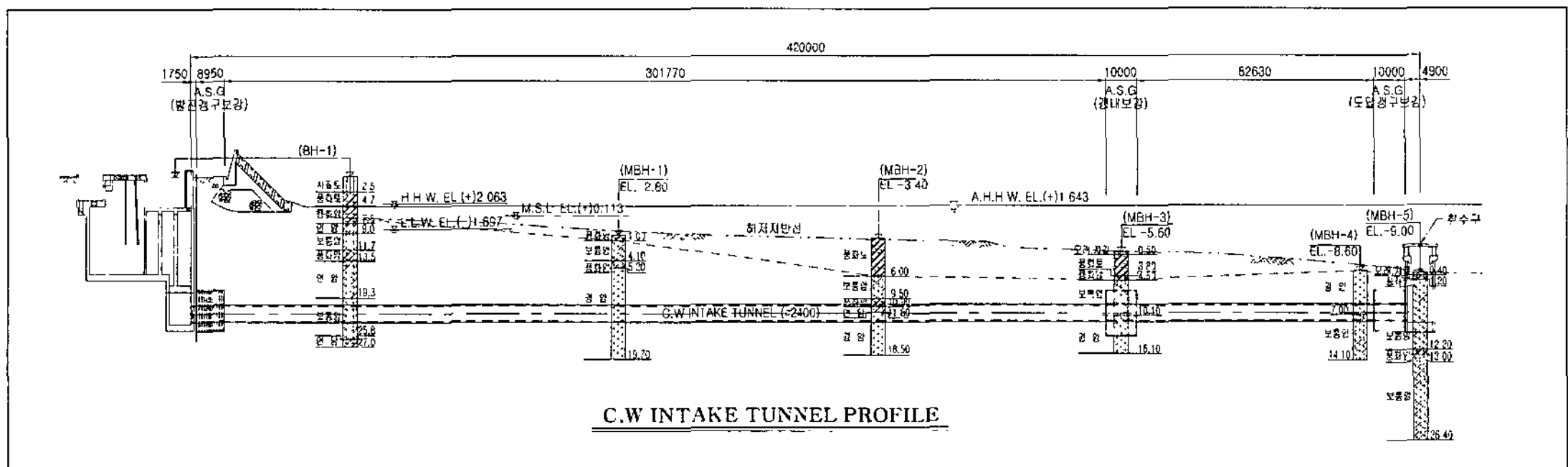
암 상부는 다공질이며, 파쇄 및 균열이 발달하고 하부의 보통암은 대체적으로 기공이 없는 치밀한 상태의 양호한 암반으로 구성되며, 부분적으로 연암과 풍화암이 교호하며 기반암의 분포가 다소 불규칙한 양상을 보이고 있는 것으로 조사결과 나타났다.

관로통과 지층 기반암의 일축압축강도는 $q_u = 397 \sim 1,101(\text{kgf/cm}^2)$ 의 강도를 보이고 있으며, 기반암 투수계수는 풍화암과 연암에서는 다공질 및 절리의 영향으로 $k = 7.1 \times 10^{-2} \sim 3.94 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ 의 높은 투수성을 보이며, 하부 기반암(연암, 보통암, 경암) 부분에서는 부분적 절리의 영향으로 $k = 8.02 \times 10^{-3} \sim 4.76 \times 10^{-5}(\text{cm/sec})$ 로 투수 ~ 불투수층의 성질을 보이고 있는 것으로 나타났다.

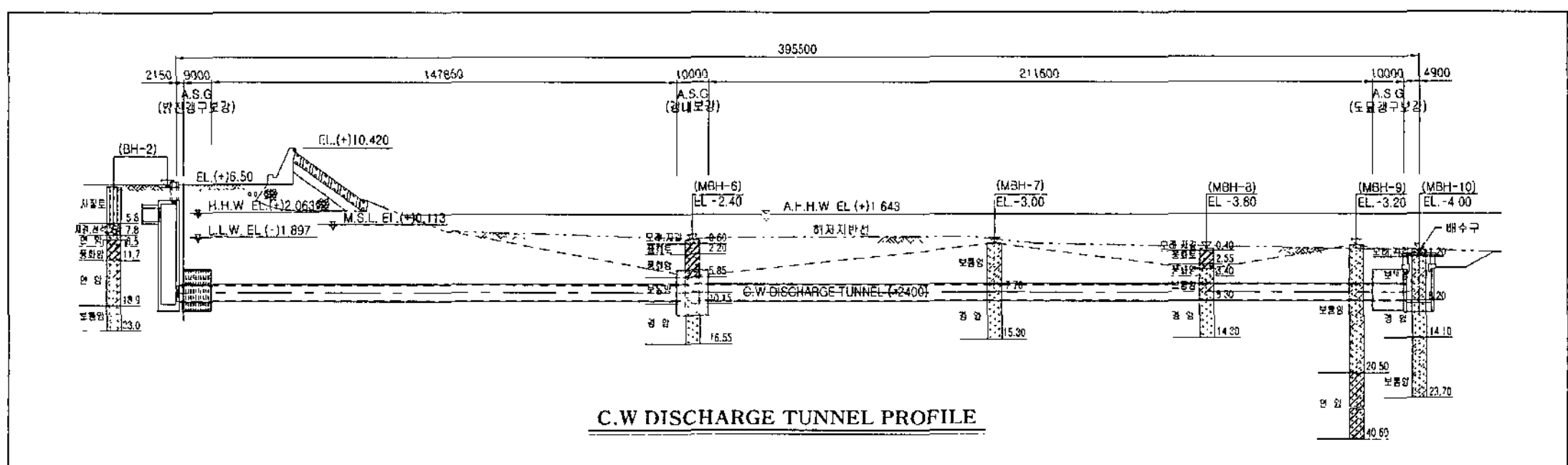
3) 해상 조건

본 발전소 전면의 수심은 약 100m 지점까지는 대체로 2m 미만으로 완만한 경사를 이루고 있으며, 해상 구조물인 취·배수탑 설치 지역 400m 지점까지의 수심은 대체로 약 4.0m(배수탑) ~ 9.0m(취수탑)의 수심을 이루고 있다. 또한 해역 전면에는 인근 주민들의 어장으로 사용되고 있다. 해저면은 대부분 다공질 현무암의 기반암지역으로, 해상 수심이 얕아 해상작업으로 인한 공사의 어려움이 예상되며, 해상 수위 조건은 표 2와 같다.

3. 취·배수로 터널설계 및 시공현황



(a) 취수로 지층단면도



(b) 배수로 지층단면도

그림 2. 취수로 및 배수로 지층단면도

표 2. 과업구간 해상 수위 조건

최고만조위 (H.H.W, m)	약최고만조위 (Approx.H.H.W, m)	약최저간조위 (Approx.L.L.W, m)	최저간조위 (L.L.W, m)	유속 (m/sec)
EL(+) 2.063	EL(+) 1.643	EL(-) 1.417	EL(-) 1.897	0.2~0.5

표 3. 취·배수로(터널) 구조물 현황

(단위 : m)

구분	내경	연장	육상발전구		해상도달구	
			현지반고	굴착지반고	현지반고	굴착지반고
취수로(터널)	2.4	405	EL.(+)6.5	EL.(-)18.1	EL.(-)9.0	EL.(-)19.0
배수로(터널)	2.4	395	EL.(+)6.5	EL.(-)13.6	EL.(-)4.5	EL.(-)14.5

1) 검토 개요

발전소의 안정적 가동을 위한 냉각수 취수를 위하여 해양조사 및 수치모형실험을 통하여 온배수 확산 범위를 선정하였으며, 시공성, 경제성, 안정성을 고려한 최적의 취·배수구 위치를 선정하였다.

취·배수로 단면설계는 관로 설계기준과 냉각수 소요량 및 유속 등 세부검토를 통하여 관로(터널) 단면을 선정하였으며, 해상 및 주변 여건을 고려하여 개착식 BOX 암거 개착 매설공법과 관로 터널공법을 세부적으로 비교 검토한 후 터널공법을 선정하였다. 본 공법의 적용으로 해상작업의 시공성 및 공기의 최소화와 해상환경오염 및 민원발생 억제가 최대한 가능하게 되었고, 또한 기계화 시공에 의한 품질 확보 및 공기, 경제성에서 유리한 것으로 나타났다.

2) 구조물 및 주변 현황

취·배수로(터널) 구조물 제원 및 주변 현황은 표 3과 같다.

3) 설계 흐름도

취·배수로 터널설계를 위한 주요 설계흐름도는 다음 사항을 고려하여 순차적인 조사 및 세부 검토

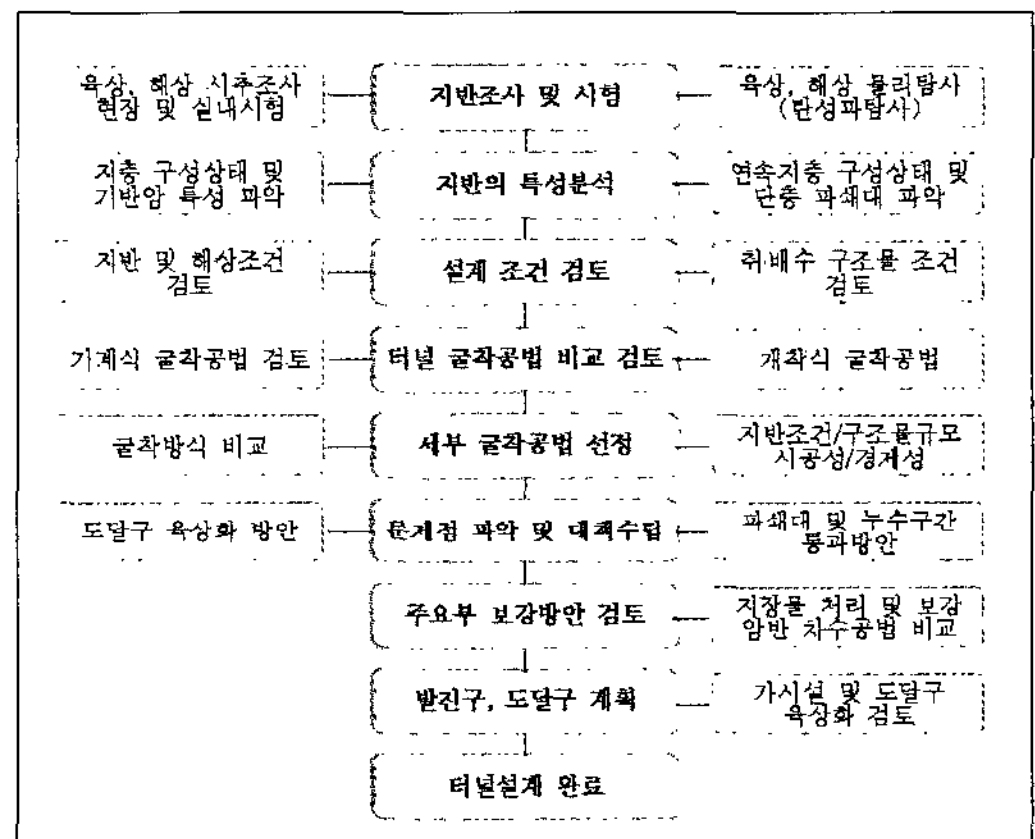


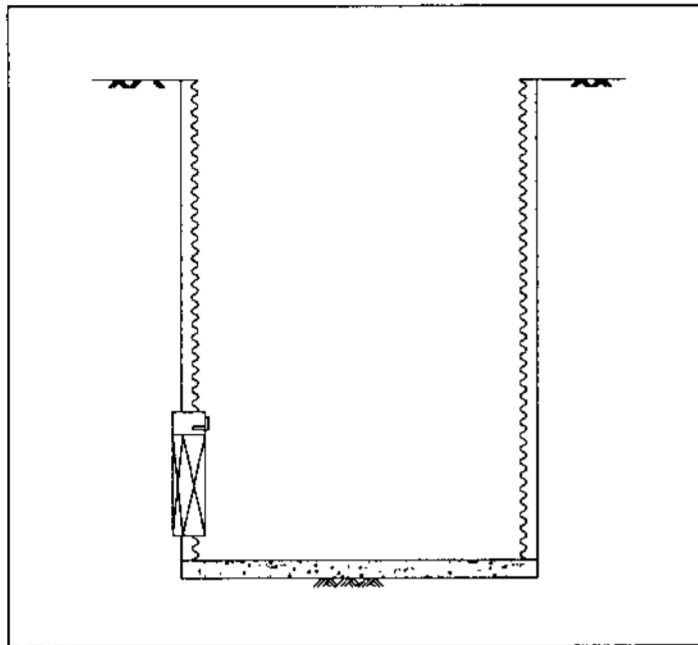
그림 3. 터널설계를 위한 설계흐름도

를 통하여 설계를 진행하였다.

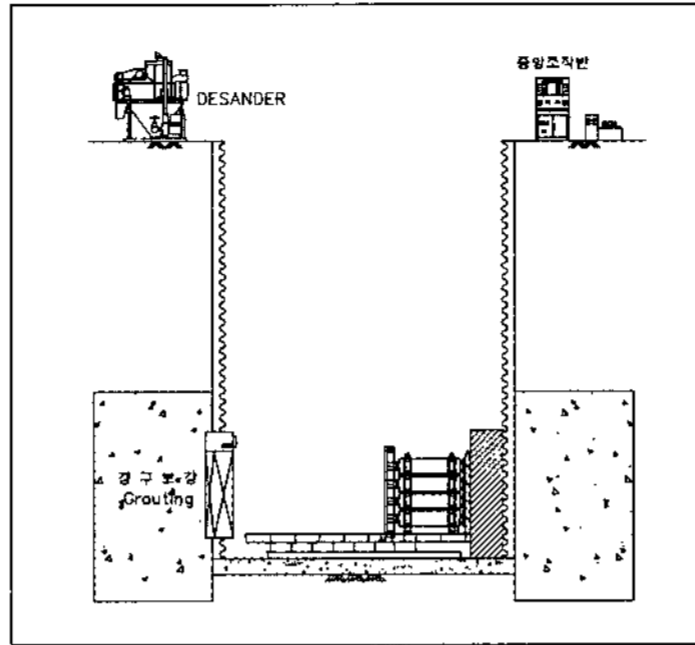
4) 터널공법의 선정

취·배수로 구조물 설계를 위하여 발전소의 부지 및 해상 여건을 고려하여 기계식 터널공법으로 선정하였으며, 기계식 터널공법 중 시공성과 경제성 등의 세부 비교검토를 통하여 현장여건에 적합한 Semi-shield공법을 적용하였다. Semi-shield 공법에는 Blind식, 이수가압식, 토압식(이토압식) 등의 방법이 있다. Blind식은 극히 연약한 점성토에 한정되어 사용되므로 본 지역에서의 지반조건(암반)을

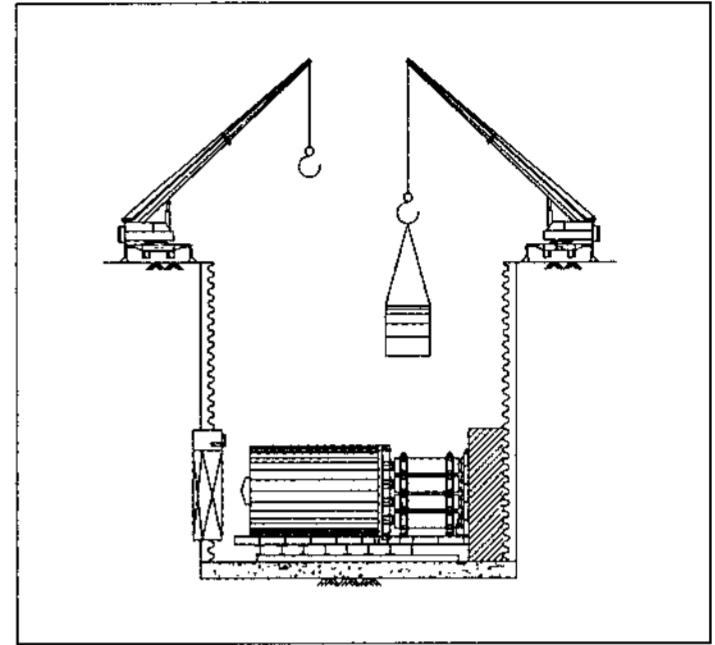
제주 현무암지역에서의 취·배수로 해저터널 설계 및 시공사례



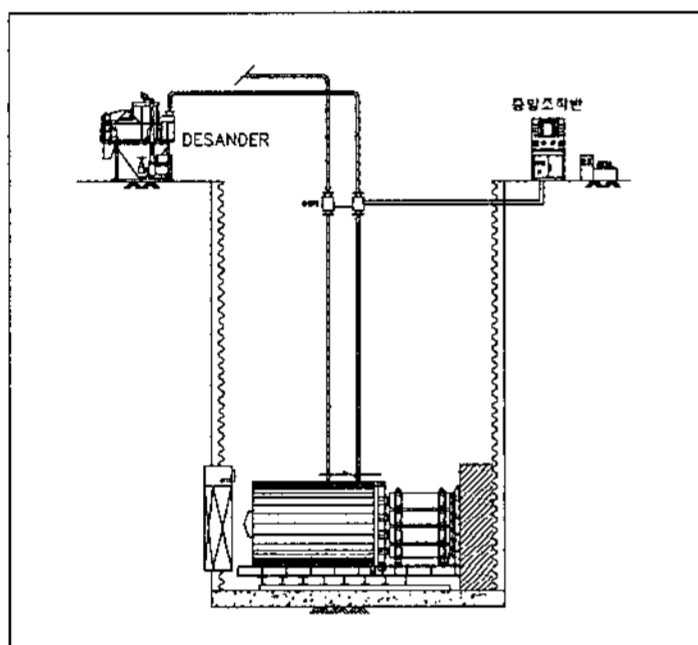
1) 작업구 및 발진구 설치



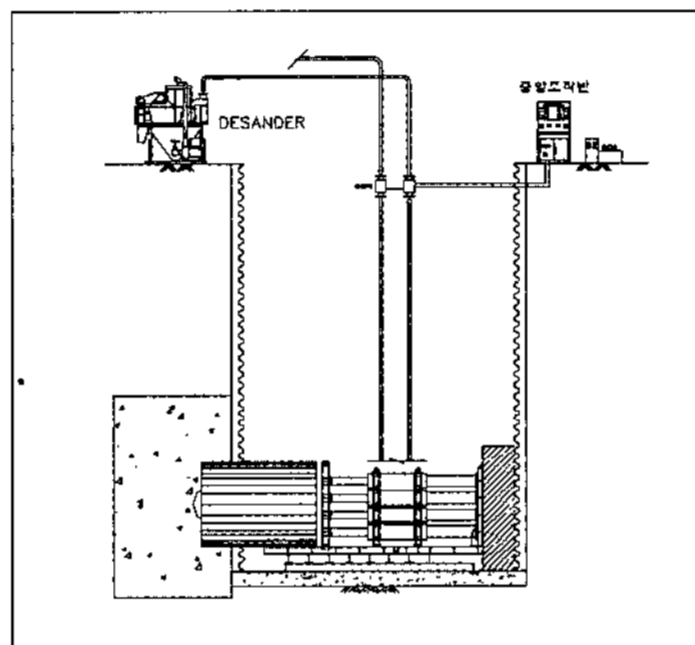
2) 추진책 및 후방설비 설치



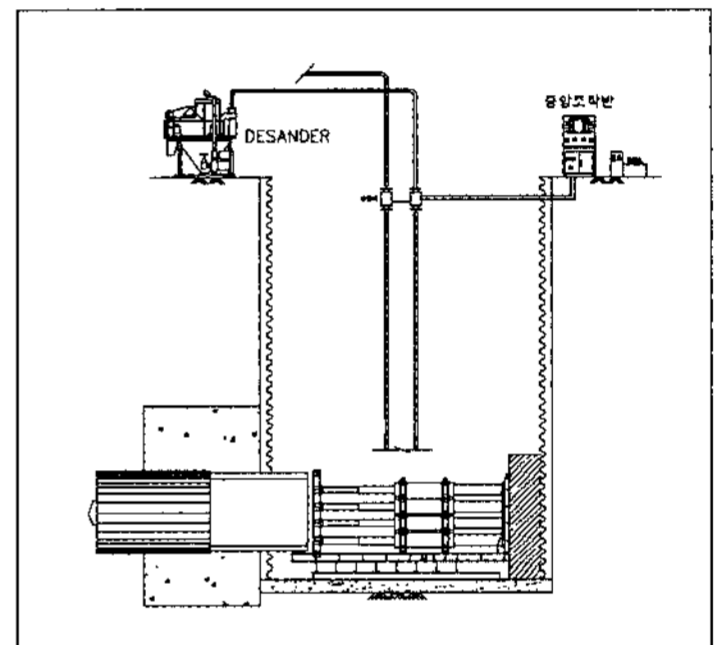
3) SEMI-SHIELD 장비투입



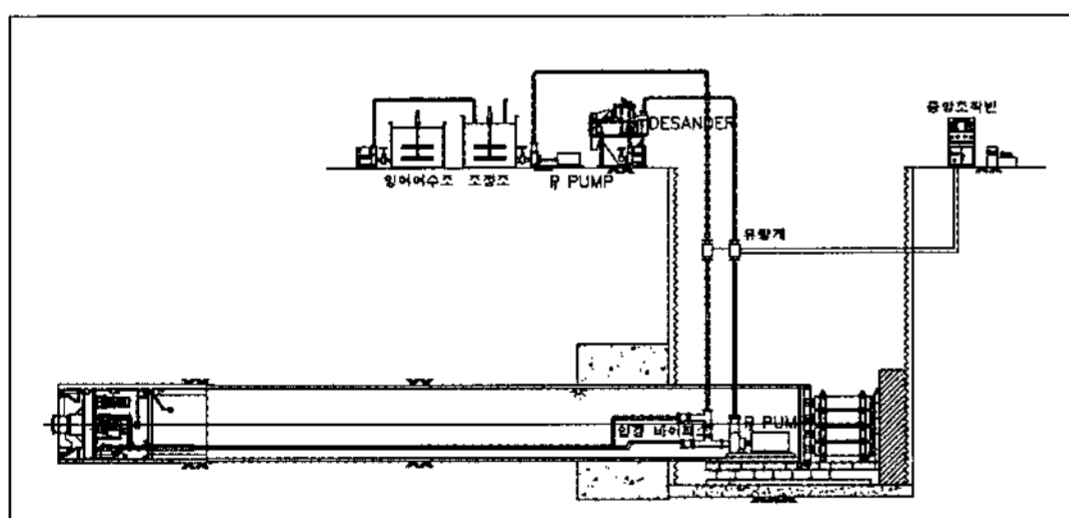
4) 종합시운전 및 조정작업



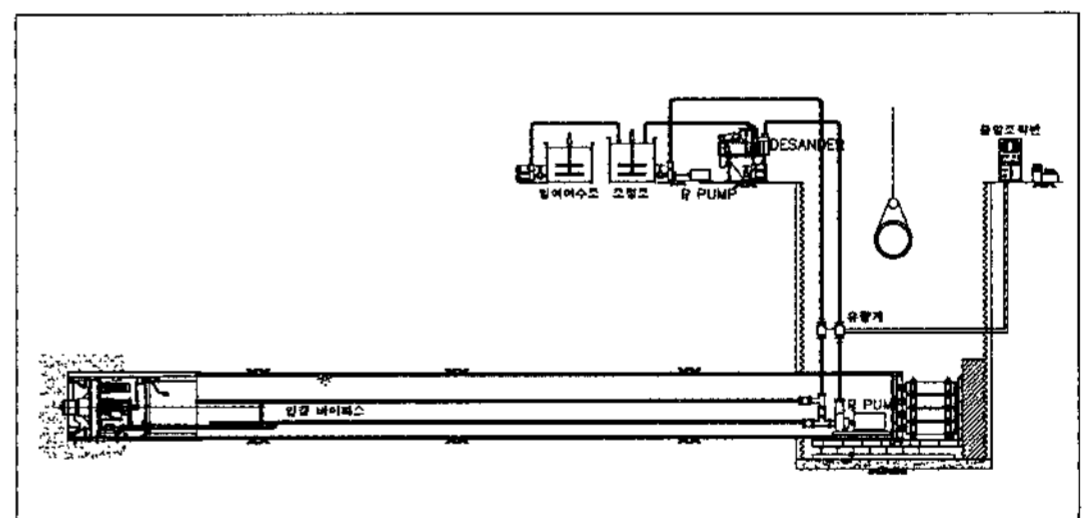
5) 초기굴진



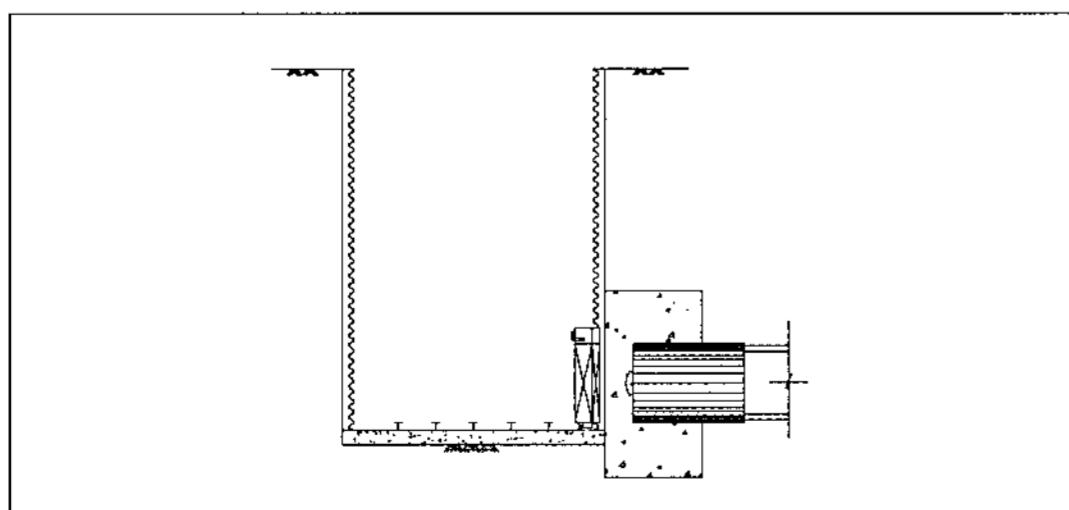
6) 추진관 SETTING



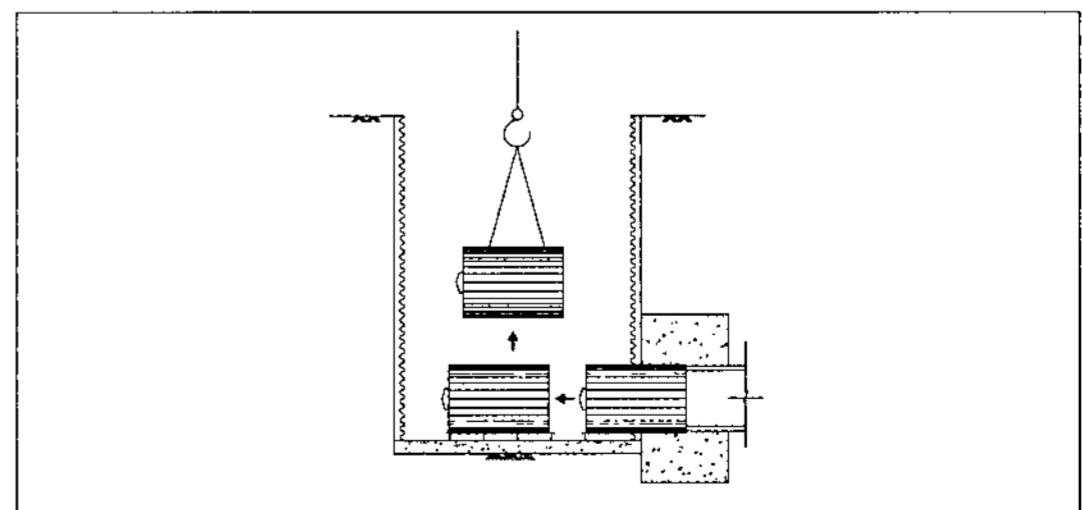
7) 굴진작업



8) 굴진중 활재주입 및 막장 안정재 주입



9) 도달구 설치



10) 추진완료 및 SEMI-SHIELD 기계인양

그림 4. Semi-shield(이수가압식)공법의 시공순서 일반도

고려하여 이수가압식과 토압식에 대하여 비교·검토하였으나, 최종적으로 화력발전소가동에 필요한 냉각수 소요량을 만족하는 관경 2.4m과 시공조건, 제주도의 다공질 현무암 지대 특성인 Clinker 층의 발달로 인한 투수층 영향, 굴진 중 내부 그라우팅 등의 지반보강 및 Cutter의 교환, 장비수리 등을 종합적으로 고려하여 이수가압식을 선정하였다.

이수가압식 Semi-shield 공법은 밀폐형 기계굴진기의 전면굴착부에 펌프로 이수를 압송하여 지반의 붕괴방지와 Cutter에 의해 굴착된 토사는 이수와 혼합되어 배니 파이프를 통해 갱외로 배출하여 외부의 Desand Plant 설비에서 이수와 토사를 분리하는

공법으로 일반적으로 주요 시공순서는 그림 4와 같다.

5) 발진구 및 도달구 계획

육상 발진구는 구조물 시공과 연계하여 Sheet Pile 가시설공법을 적용하였으며, 해상 수심이 4.0m(배수탑)~9.0m(취수탑)인 지점까지 최종굴진 완료후에 Semi-shield 장비인양을 위해 해상에서 육상화 여건을 조성하였으며, 육상화방법은 강재케이스 설치하는 것으로 계획하였다.

지반조사 결과 해저지반이 대부분 기반암으로 구성되어 강재케이스 거치방법은 사전 굴착후 케이스를 인양하여 거치하는 방법을 채택하였으며, 케이스

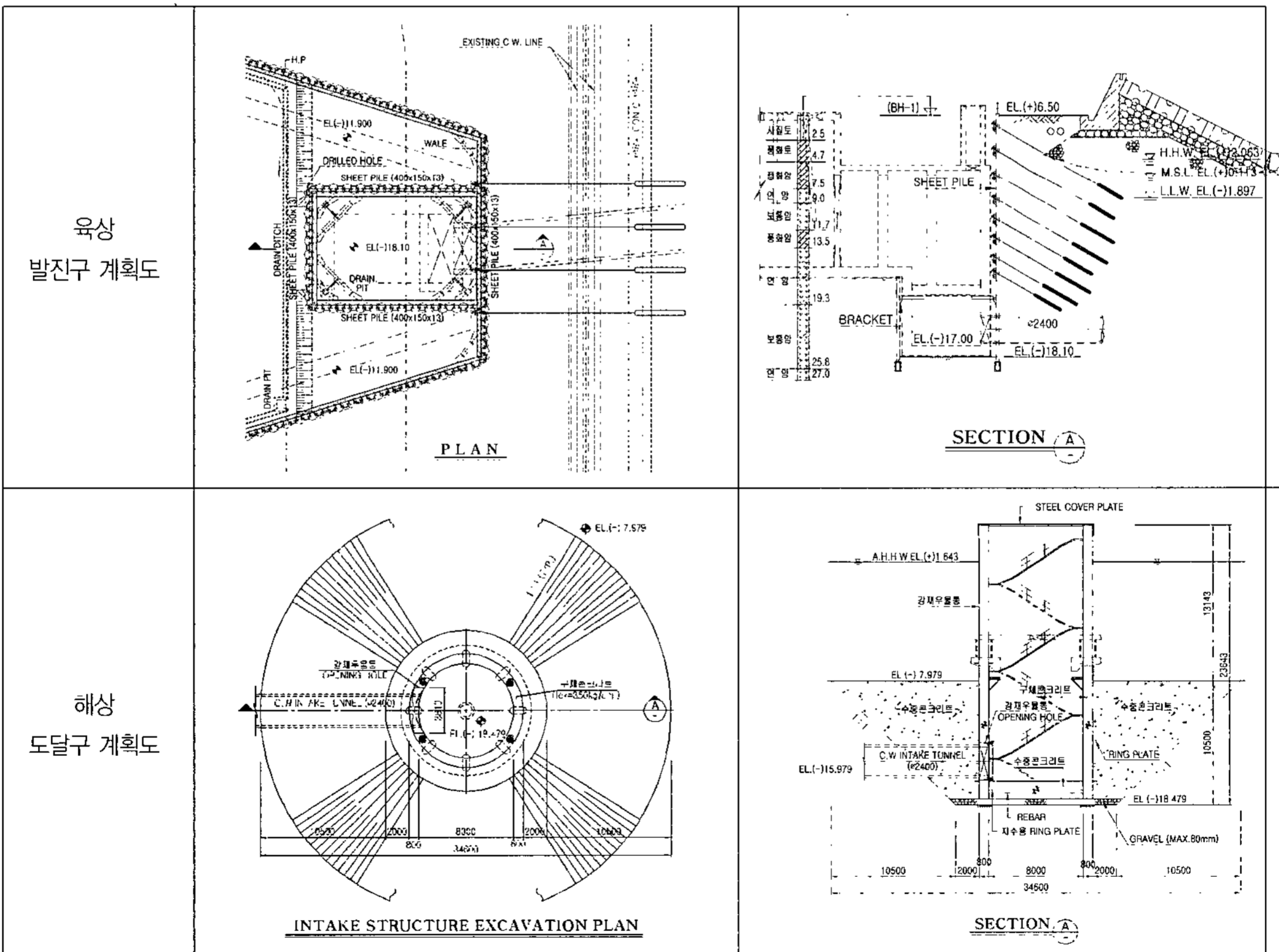
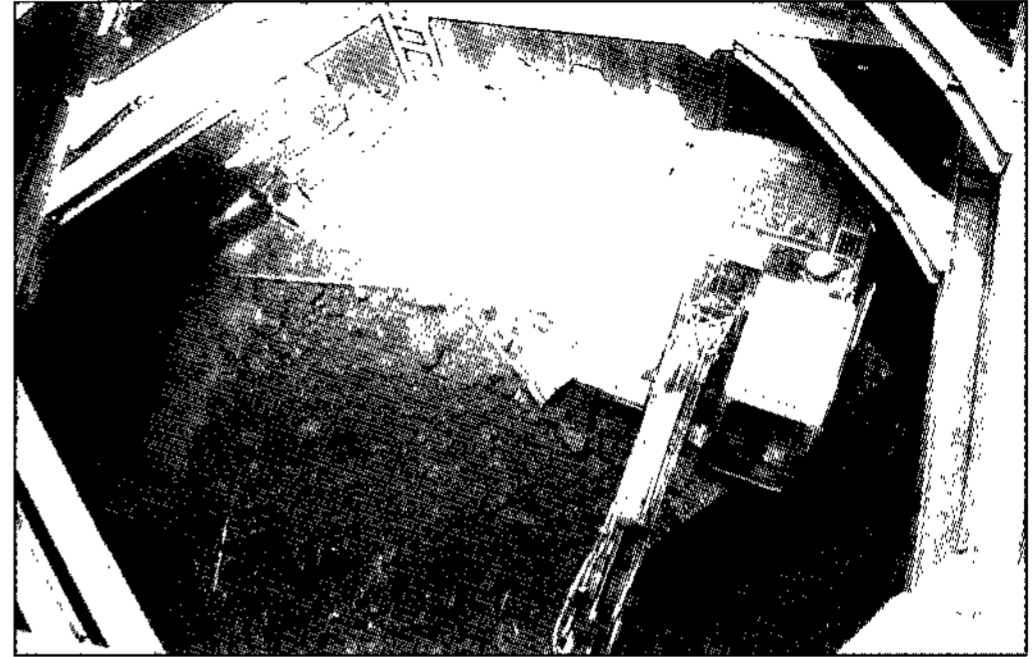


그림 5. 육상발진구 및 해상도달구 계획상세도



(a) 취수로 공사



(b) 배수로 공사

그림 6. 발진작업구 공사

거치후 내부 벽체콘크리트를 타설하고 굴진완료 시점에 터널 내에서 주변 보강그라우팅을 시행하여 육상화 여건을 조성한 후 Semi-shield 굴진장비를 인양하는 것으로 계획하였다.

육상 추진구 및 해상 도달구 계획 평면 및 단면은 그림 5와 같다.

6) 터널시공 현황

냉각수 취·배수로 터널공사의 주요 공정별 시공 현황은 다음과 같다.

■ 발진작업구(좌:취수로, 우:배수로) 공사

추진작업구는 해상 인접지역으로 외부 수위를 고려하여 Sheet Pile을 이용한 가시설공법을 적용하였고, 작업구 규모는 취수관로 내경 2.4m의 굴진기의 작업공간을 고려하여 6.9m x 9.6m 규모로 시공하였다.

■ Semi-Shield 기계 거치 및 유압잭 설치

발진작업구 굴착 완료후 벽면 엔트란스 및 반력벽 및 기초콘크리트 타설후 Semi-shield 기계를 거치하고 후방에 100ton 유압잭 8개소를 설치 후 관을 추진하였다.



그림 7. Semi-Shield 기계 거치 및 유압잭 설치

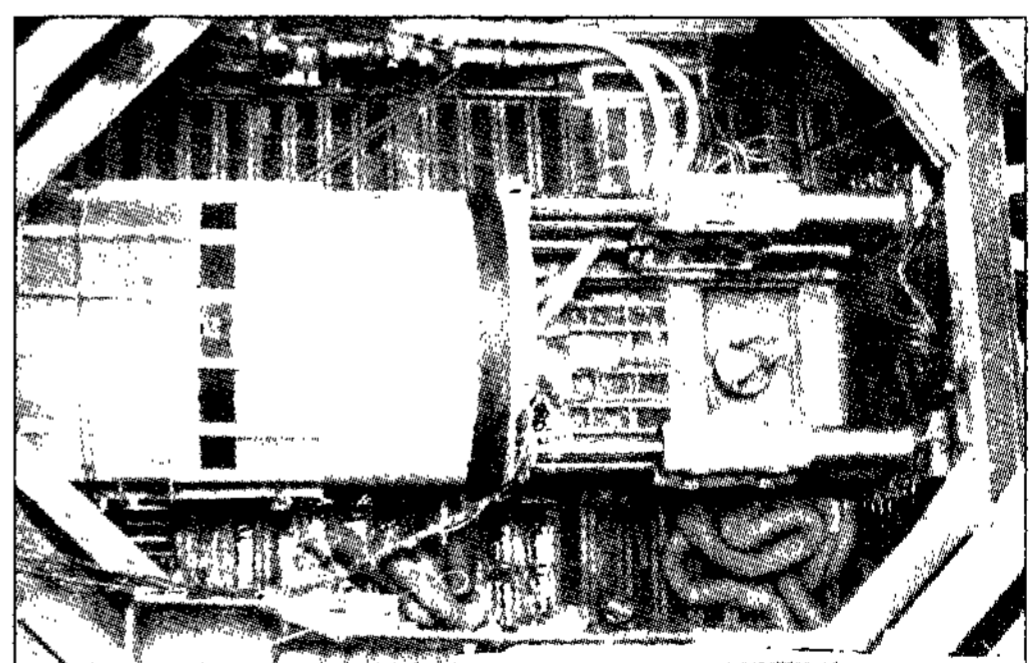


그림 8. 관 추진 및 중압관 설치(원압 1단, 중압 4단 시공)

■ 관 추진 및 중압관 설치

추진관의 규격은 내경 2.4m, 외경 2.8m로 콘크리트 압축강도는 500kg/cm²의 규격을 사용하였으며, 중압관은 압축강도 500kg/cm²로 100ton 중압잭 8

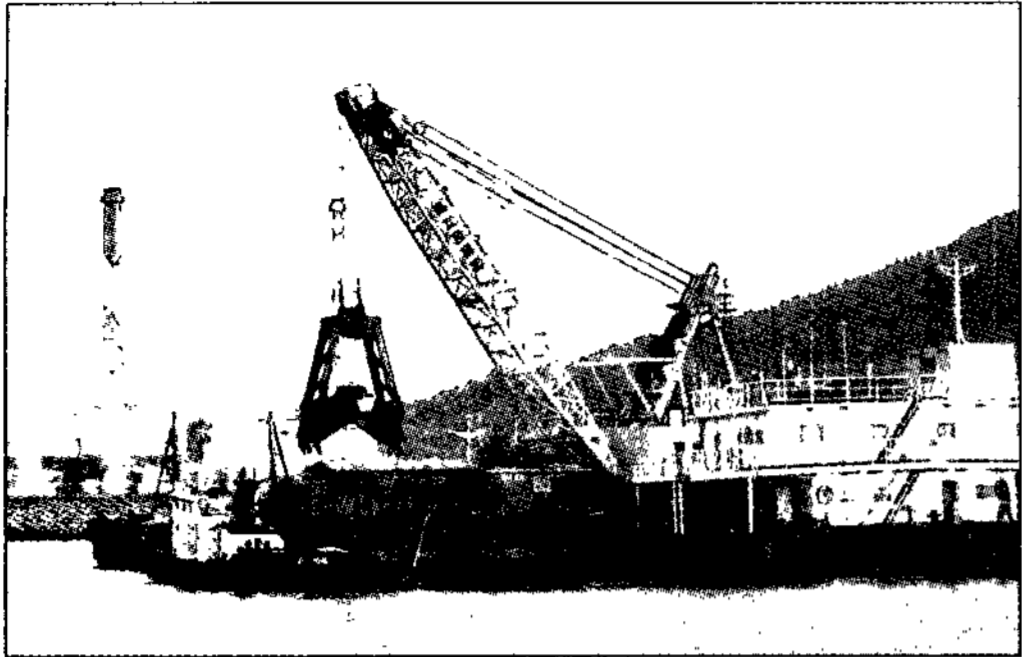


그림 9. 해상 준설 및 굴착

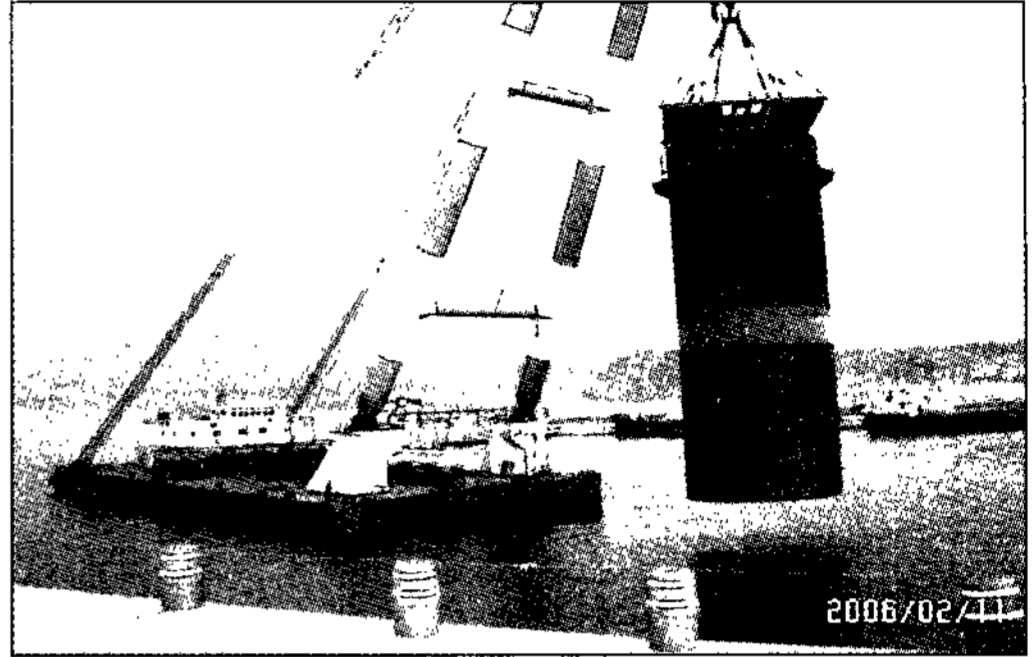


그림 10. 해상 육상화 작업을 위한 케이슨 설치

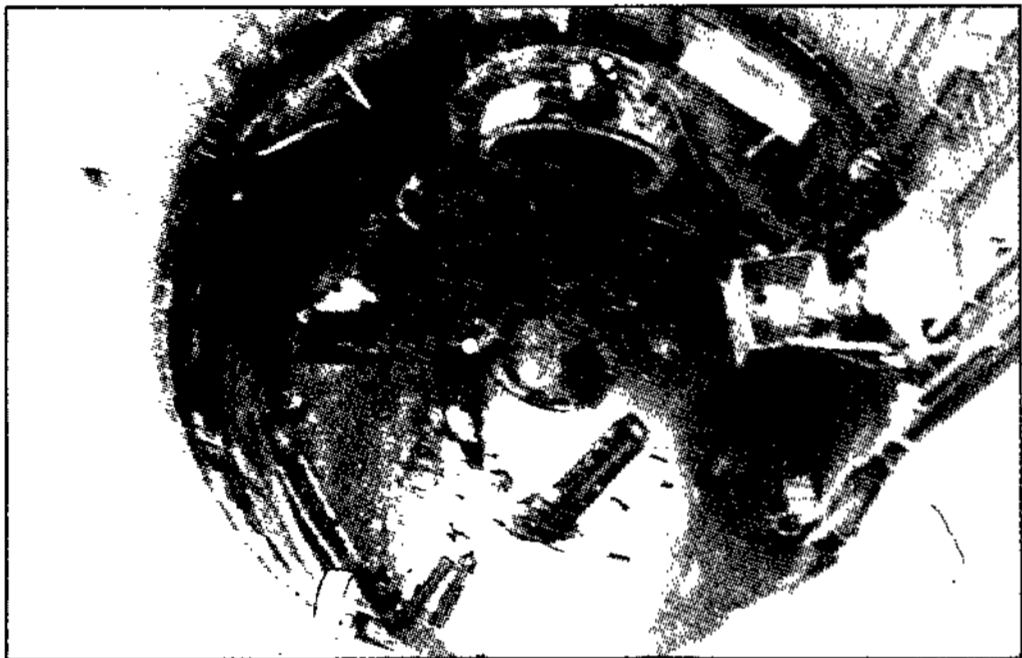


그림 11. 관추진 완료 및 케이슨과의 연결

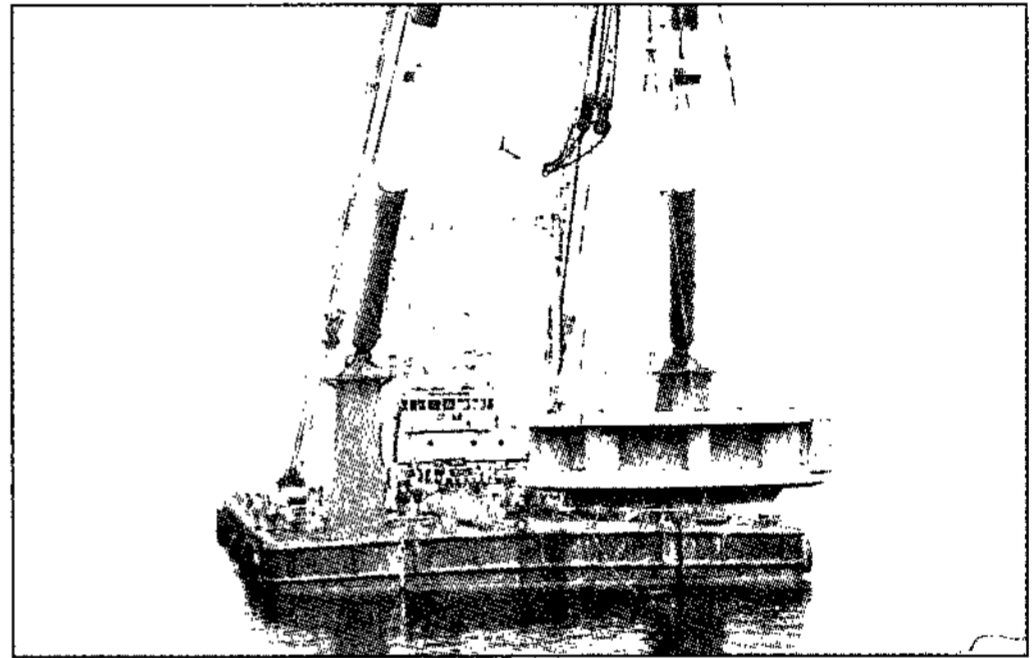


그림 12. 탐(취수 or 배수) 설치

개소를 설치하였다.

굴진시 실굴진 속도는 암질 또는 추력에 따라 0.19~0.40m/hr의 속도를 보였고, 작업보강 등을 고려한 평균굴진속도는 0.13m/hr의 굴진속도를 보였다.

■해상 준설 및 굴착

취수구 설치와 세미셴드 장비 인양을 위한 강제케이슨 거치를 위하여 해상 준설 및 굴착 작업을 수행하였으며, 사용 장비는 발파장비, 쇄암봉 30ton급, 그라브 준설선 8.0m³, 예인선, 대선을 이용하였다.

■해상 육상화 작업을 위한 케이슨 설치

도달구 육상화 작업을 위해 강제케이슨을 제작 설치하였다.

강제케이슨 규모는 8.0m(I.D)x 9.6m(O.D) x

28.0m(H)로 케이슨 거치는 해상바지크레인 600ton급을 이용하였다.

■관추진 완료 및 케이슨과의 연결

거치된 해상 강제케이슨 내에서 미리 중공벽으로 제작된 철판을 제거하고 케이슨내 도달구 외곽을 보강한 후 세미셴드 굴진기를 이용하여 굴진하여 취수 케이슨 벽체와 관로를 연결하였다.

■탐(취수 or 배수) 설치

케이슨 벽체콘크리트 타설후 수중작업으로 벽체 상부 케이슨을 제거한 후 육상 제작된 취수탐을 해상바지(Barge)크레인을 이용하여 케이슨 상부에 거치 체결하였다.

4. 시공중 발생한 문제점 및 처리방안

1) 터널굴진시 추력상승

- 배니관을 통하여 완전 제거되지 않은 암반의 석분이 추진관 외벽의 하부에 침전되어 추진관과 굴착면의 마찰력 상승으로 인한 추력의 증가현상 발생됨
- 설계시 조사에서 나타나지 않은 파쇄대의 출현(파쇄대 출현시 보강그라우팅 계획 수립)으로 인한 누수량 증가로 인한 활재 주입시 유실 현상으로 인한 추진관과 암반의 주면마찰력 상승으로 인하여 추력이 증가됨
- 계획보다 큰 추력 및 반력작용으로 인한 중압관 소요 분수 증가됨

2) 중압관 누수 및 주입재 유실

- 장거리 추진으로 인한 중압관 사용시 중압관의 장기사용으로 인한 마찰현상이 발생하여 지수 고무가 손상되어 중압관부분에 지속적인 누수가 발생되어 배수처리 수량이 증대됨
- 다공질층 현무암 굴진시 대수층의 출현으로 터널내부에서의 보강그라우팅 및 양수 처리를 위한 소요공기가 증대됨
- 추진관과 굴착면과의 마찰력 감소를 위해 주입되는 윤활제가 굴진중 누수로 인한 손실로 마찰력이 오히려 증대되고 윤활제 주입량 역시 과다 소요됨

3) 추진방향의 편심력발생

- 암반굴진시 추진관 저부에 석분 등이 적체되어 상향의 추진력이 발생됨
- 굴진시 추진책의 편심작용으로 인한 추진관의

균열 손상 발생

- 선단부 지반불균일로 인한 쉘드머신의 굴진 방향 편기시 방향수정을 위한 굴진속도 저하로 공기 증대 또는 편기발생시 목표지점까지 도달구 수정 필요

5. 향후 개선 및 보완사항

- 1) 계획노선 전구간에 대한 기초지반의 정밀한 해상 지질조사 및 물리탐사 시행으로 기초지반의 세부정보 파악 후 사전 문제예상지역에 대한 충분한 보완 대책 수립
- 2) 암반지역에서의 굴진시 굴착전면부 하부 슬라임(석분) 적재를 방지하기 위한 굴착전면부의 배니시스템 보완 및 개발
- 3) 중압관 연결부 지수판의 장기 사용에 따른 지수 고무 손상을 방지할 수 있는 시스템 개발하여 누수현상을 최소화함에 따라 굴착면과 추진관의 마찰력 감소(즉, 윤활제의 역할증대)로 중압관 사용분수 감소 및 굴진력 향상
- 4) 정밀하고 자동화된 방향성 측량을 실시하여 굴진방향 오차를 사전에 조정함으로써 상향의 추진력으로 인한 부분 편심발생 억제

6. 결론 및 제언

본고는 국내에서는 최초로 계획되어진 해저 심층 취·배수로의 기계식 터널화 설계 및 시공을 완료하고 특히, 다공질 현무암지대에서의 세미셸드공법의 설계 및 시공사례를 소개함으로써 향후 수행될 유사

사업에 조금이나마 도움이 되고자 하였으며, 설계 및 시공시 주요사항을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 최근까지도 발전소 취·배수 구조물 계획시 해상지반 개착과 지반개량 등을 실시한 후 박스암거(Con.c Box Culvert) 또는 원형관로(Pipe)를 설치하는 것이 일반적이었으나, 주변지역과 연계성 및 지질조건, 시공성, 경제성 등을 충분히 고려하여 개착식과 더불어 터널형식이 종합적으로 검토되어야 한다.
- 2) 터널공법은 설계와 시공의 오차를 최대한 줄이기 위하여 지질조건을 충분히 파악하여야 하며, 충분한 지질조사 및 물리탐사가 수행되어야 한다.
- 3) 세미실드공법을 적용한 남제주 다공질 현무암 지역에서는 Clinker층으로 인한 대수층의 출현으로 굴진중 지하수가 유입되어 사전 지질파악 및 적절한 차수공법의 적용이 선행되어야 하는 것으로 파악되었다.
- 4) 터널 세부공법 선정시 사전 문제점(터널 장비, 지반조건 등)을 철저히 파악하여 이에 대한 대처방안이 충분히 고려되어야 한다.
- 5) 터널장비를 해상에서 인양하기 위한 도달구(케이스)의 해상 정위치 거치를 위해 파랑에서도 견딜 수 있는 보조공법의 적용이 강구되어야 한다.

- 6) 추진시 방향오차를 줄이기 위해 굴진전면 하부에 적재된 슬라임(석분)의 제거를 위한 배니 시스템의 보완 개발이 모색되어야 한다.
- 7) 중구경의 기계식 터널장비에 있어서도 자동화된 측량 및 계측 시스템이 개발 또는 설치되어 정밀시공과 시공 관리를 위한 기준이 되도록 하여야 한다.

참고 문헌

1. 해양수산부, 항만 및 어항설계 기준(2000)
2. 해양수산부, 항만공사 표준시방서(2000)
3. 건설교통부, 터널설계기준(1999)
4. 한국에스이씨, Semi-Shield 공법(1995. 10)
5. 한국지반공학시리즈, 터널(1997. 6)
6. 건설교통부, 도로교 하부설계기준 및 해설(2003)
7. 한국남부발전, 수치모델링결과보고서(2004. 7)
8. 건설교통부, 토목공사 표준일반시방서
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서(2003)
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계 기준(2003)
11. 한국지반공학회, 구조물 기초 설계기준(2003)

